

EP15 Rec'd PCT/PT 09 JAN 2006

Continental Teves AG &amp; Co. oHG

07.07.2004  
GP/JC  
P 10984Dr. J. Kohn  
Dr. I. Runge  
Dr. S. Kluge  
Dr. A. Köbe  
H. Behrends  
L. Gootjes  
A. Duchow**Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks eines  
Fahrzeugreifens**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Reifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die normierte Amplitude ermittelt wird und die Amplitudenmaxima der Resonanzfrequenz beobachtet werden.

Ein solches Verfahren ist beispielsweise aus der US 6,450,020 B1 bekannt. Die DE 101 57 858 A1 offenbart ein Verfahren zum Bestimmen des Reifenluftdrucks aus dem Fahrzeugbetrieb bei niedrigen und hohen Geschwindigkeiten, das unabhängig von verschiedenen, an dem Fahrzeug angebrachten Elementen bereitgestellt wird. Dieses Verfahren basiert auf einer Resonanzfrequenz, die auf der Grundlage eines Radgeschwindigkeitssignals extrahiert wurde, das über einen jedem Rad zugeordneten Geschwindigkeitssensor ausgegeben wurde. Die Bestimmung des Reifenluftdrucks basiert außerdem auf einem dynamischen Lastradius, der auf der Grundlage des Radgeschwindigkeitssignals abgeleitet wurde.

Die Stärke und Frequenzlage der beim Abrollen entstehenden Reifenschwingungen sind stark abhängig vom Innendruck des Reifens, der sowohl die Steifigkeit als auch die Dämpfung

des Rades bestimmt. Diese Eigenschaften bestimmen auch, mit welcher Intensität und Frequenz die Felge zu Drehschwingungen angeregt wird. Die Drehschwingungen des Rades lassen sich beispielsweise mit einem ABS-Drehzahlsensor messen.

Am deutlichsten treten die Drehschwingungen bei den vom Innendruck abhängigen Resonanzfrequenzen auf.

Für einen möglichst wirtschaftlichen Betrieb eines Kraftfahrzeuges und zum Erreichen hoher Haltbarkeit müssen die Reifen mit einem vorgegebenen Luftdruck befüllt sein. Aufgrund von Diffusionsverlusten und Dichtungsverlusten im Reifen sinkt der Luftdruck stetig ab. Die entstehenden Leckageraten sind unvermeidlich und liegen typischerweise im Bereich einiger 100 mbar pro Jahr. Der Reifenluftdruck muss deshalb regelmäßig kontrolliert werden. Der durchschnittliche Kraftfahrer neigt jedoch dazu, dem Reifendruck keine oder zumindest nicht die angemessene Aufmerksamkeit zukommen zu lassen. Aus diesem Grund werden Kraftfahrzeuge zunehmend mit Reifendruckkontrollsystemen ausgerüstet, die den Luftdruck im Reifen kontinuierlich überwachen und eine Warnmeldung für den Fahrer abgeben, wenn der Reifendruck unter einen vorgegebenen Mindestdruck absinkt.

Es sind direkt messende Systeme bekannt, bei denen sich im Druckraum des Fahrzeugrades ein Sensor befindet, der den Druck misst. Das den ermittelten Reifeninnendruck auslesende Meßsystem wird in der Regel von einer Batterie versorgt und überträgt seine Messdaten über eine Funkstrecke. Nachteilig an diesem System ist neben der von der Batterielebensdauer abhängigen Funktionsfähigkeit auch die durch den Sensor und die Stromversorgung entstehende Unwucht an der Felge von bis zu 20 g.

Indirekt messende Systeme nutzen die sich einstellende Änderung im Abrollumfang eines Rades bei Luftdruckänderung im Reifen aus. Die Änderung des Abrollumfanges wird über die ABS-Sensoren ermittelt, die alle Räder eines Fahrzeuges gleichzeitig detektieren und entsprechende Daten auswerten. Diese Systeme haben den grundsätzlichen Nachteil, dass ein nahezu identischer Druckverlust in allen Reifen, wie er sich durch die Leckageverluste zwingend einstellt, nicht erkennbar ist.

Die JP 5-133 831 offenbart eine Vorrichtung zum Bestimmen des Innendrucks eines Fahrzeugreifens. In dieser Vorrichtung wird die Resonanzfrequenz des Reifens durch eine Frequenzanalyse ermittelt, die in Bezug auf ein Geschwindigkeitssignal des Rades einschließlich der Schwingungsfrequenz des Reifens durchgeführt wird. Der aktuelle Druck wird aus der ermittelten Resonanzfrequenz bestimmt. Die zur Bestimmung des Luftdrucks verwendete Resonanzfrequenz bewegt sich im Bereich von 30 - 50 Hz. Dieser Bereich ist ausreichend, wenn das Fahrzeug sich im unteren oder mittleren Geschwindigkeitsbereich befindet. Nimmt die Fahrzeuggeschwindigkeit zu, ist das Schwingungsverhalten eines Reifens schwer zu bewerten. Im Ergebnis sinkt das Spektrum der Resonanzfrequenz ab und verschlechtert damit die Aussagekraft in Bezug auf den Reifeninnendruck.

In der JP 8-219 920 ist eine Vorrichtung beschrieben, mit der mehrere Resonanzfrequenzen aus mehreren Frequenzbereichen, beispielsweise einem Bereich von 30 - 50 Hz und einem Bereich von 60 - 90 Hz ermittelt werden.

Dem Verfahren nach der US 6,385,553 liegt die Erkenntnis zugrunde, dass das Radgeschwindigkeitssignal eines angetriebenen Rades eine Resonanzfrequenz höherer Ordnung enthält, die sich auch dann sehr stark mit der Veränderung

des Reifeninnendruckes ändert, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit hoch ist. In dieser Druckschrift wird sehr ausführlich beschrieben, wie das Frequenzspektrum ermittelt und die interessierende Resonanzfrequenz mathematisch beispielsweise durch eine Fouriertransformation (FFT) ermittelt wird, so dass eine normierte Amplitude über der Frequenz aufgetragen werden kann.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, Verfahren anzugeben, mit denen die beispielsweise nach der US 6,385,553 ermittelte Resonanzfrequenz ausgewertet werden kann, um zu erkennen, ob der Reifeninnendruck eines beliebigen Rades des Fahrzeuges unter einen vorgegebenen Wert absinkt, um dem Fahrer ein entsprechendes Warnsignal zu geben.

Ein erstes Auswerteverfahren zeichnet sich durch folgende Schritte aus:

- a) Ermitteln und Aufzeichnen der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
- b) Ermitteln und Speichern der Gradienten  $1_{soll}$ ,  $2_{soll}$  der Frequenzkurve oberhalb und unterhalb der Resonanz,
- c) Bilden des Verhältnisses  $s_{oll}$  aus den Gradienten  $1_{soll}$  und  $2_{soll}$ ,
- d) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
- e) kontinuierliches Ermitteln der Gradienten  $\alpha_{1st}$ ,  $\alpha_{2ist}$  der Frequenzkurve oberhalb und unterhalb der Resonanz,
- f) Bilden des Verhältnisses  $\alpha_{ist}$  aus den Gradienten  $\alpha_{1st}$  und  $\alpha_{2ist}$ ,

- g) kontinuierliches Vergleichen der Verhältnisse  $\alpha_{ist}$  und  $\alpha_{soll}$  miteinander,
- h) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von  $ist$  zu  $soll$  einen definierten Wert überschreitet.

Bei der Auswertung der Schwingungscharakteristik wird das Verhältnis der Steigungen links und rechts des Maximums bestimmt. Der Frequenzbereich liegt vorzugsweise zwischen 20 - 60 Hz und 70 - 110 Hz. Das Verhältnis der Steigungen liegt im Bereich von -0,25 bis -4.

Ein weiteres erfindungsgemäßes Verfahren zeichnet sich durch folgende Schritte aus:

- a) Ermitteln und Aufzeichnen der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
- b) Ermitteln der xdB-, insbesondere 3 dB-Grenzfrequenz  $f_{G1soll}$ ,  $f_{G2soll}$  der Maxima,
- c) Bilden und Speichern der Differenzfrequenz  $f_{Gsoll}$  aus der oberen xdB-Grenzfrequenz  $f_{G2soll}$  und der unteren xdB-Grenzfrequenz  $f_{G1soll}$ ,
- d) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
- e) kontinuierliches Ermitteln der xdB-, insbesondere 3dB-Grenzfrequenzen  $f_{G1ist}$ ,  $f_{G2ist}$  der Maxima im Fahrbetrieb,
- f) Bilden der Differenzfrequenz  $f_{G1st}$  aus der oberen xdB-Grenzfrequenz  $f_{G2ist}$  und der unteren xdB-Grenzfrequenz  $f_{G1ist}$ ,

- g) kontinuierliches Vergleichen der Differenzfrequenzen  $f_{G_{soll}}$  und  $f_{G_{ist}}$  miteinander,
- h) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von  $f_{G_{ist}}$  zu  $f_{G_{soll}}$  einen definierten Wert überschreitet.

Dieses Verfahren nutzt das Phänomen aus, dass die xdB-Grenzfrequenzen der Maxima mit steigendem Luftdruck in Richtung höherer Frequenzen wandern. Aus der Abhängigkeit kann dann der aktuelle Luftdruck des Reifens bestimmt werden. Auch dieses Verfahren kann für jedes Rad einzeln durchgeführt werden, wobei eine Korrelation der Räder untereinander nicht erforderlich ist.

Ein drittes erfindungsgemäßes Auswerteverfahren zeichnet sich durch folgende Schritte aus:

- a) Ermittlung und Aufzeichnung der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
- b) Ermitteln und Speichern des maximalen Amplitudenwertes  $a_{soll}$  bei Soll-Druck des Reifens,
- c) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
- d) kontinuierliches Ermitteln des maximalen Amplitudenwertes  $a_{ist}$ ,
- e) kontinuierliches Vergleichen der maximalen Amplitudenwerte  $a_{soll}$  und  $a_{ist}$  miteinander,
- f) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von  $a_{ist}$  zu  $a_{soll}$  einen definierten Wert überschreitet.

Auch bei diesem Verfahren wird die normierte Amplitude zur Bestimmung des Luftdrucks verwendet.

Ein viertes gattungsgemäßes Verfahren zeichnet sich durch folgende erfindungsgemäße Schritte aus:

a) Ermitteln und Aufzeichnen des Frequenzspektrums des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck und Bestimmung der ungefähren Lage der Resonanzfrequenz,

b) Transformieren der das Schwingungsverhalten des Rades beschreibenden Differentialgleichungen

mittels Laplace- oder Fouriertransformation,

c) Auswählen eines Bereichs  $f_{soll}$  um die ungefähre Lage der Resonanzfrequenz  $f_{soll}$  herum,

d) Korrelieren des ausgewählten Bereichs  $f_{soll}$  mit den transformierten Differentialgleichungen,

e) Berechnen der Rotationssteifigkeit  $c_{s,soll}$  und der Rotationsdämpfung  $d_{s,soll}$ ,

f) kontinuierliches Ermitteln des Frequenzspektrums des Rades im Fahrbetrieb und Bestimmung der ungefähren Lage der Resonanzfrequenz  $f_{ist}$ ,

g) Auswählen eines Bereichs  $f_{ist}$  um die ungefähre Lage der Resonanzfrequenz  $f_{ist}$  herum,

h) Korrelieren des ausgewählten Bereichs  $f_{ist}$  der ermittelten Resonanzfrequenz  $f_{ist}$  mit den transformierten

Differentialgleichungen zur Bestimmung der Rotationssteifigkeit  $c_{s,ist}$  und der Rotationsdämpfung  $d_{s,ist}$ ,

- i) Bilden der Differenz von  $c_{s,soll}$  und  $c_{s,ist}$  und der Differenz von  $d_{s,soll}$  und  $d_{s,ist}$  und Erzeugen eines Signals, wenn mindestens eine der Differenzen einen definierten Wert überschreitet.

Zur Anwendung des dem Verfahren vier zugrundeliegenden Modells müssen vorab geeignete Werte für die Trägheitsmomente von Reifen  $J_F$  und Felge  $J_R$  sowie für den Reifenradius  $r$  festgelegt werden, die die für das jeweilige Fahrzeug typischen Reifen und Felgen repräsentieren.

In Ergänzung zu Verfahren vier kann in einem fünften gattungsgemäßen Verfahren auch der Reifendruck direkt aus Kennfeldern  $p(c_s, d_s)$  bestimmt werden. Es zeichnet sich durch folgende über Verfahren vier hinausgehende erfindungsgemäße Schritte aus:

- a) Ermitteln des Reifeninnendrucks  $p_{soll}(c_{s,soll}, d_{s,soll})$  im Sollzustand in Abhängigkeit von der Rotationssteifigkeit  $c_s$  und der Rotationsdämpfung  $d_s$ , wobei hierzu Kennfelder herangezogen werden, die die für das jeweilige Fahrzeug typischen Reifen berücksichtigen,
- b) Ermitteln des Reifeninnendrucks  $p_{ist}(c_{s,ist}, d_{s,ist})$  im Istzustand in Abhängigkeit von der Rotationssteifigkeit  $c_s$  und der Rotationsdämpfung  $d_s$ , wobei hierzu Kennfelder herangezogen werden, die die für das jeweilige Fahrzeug typischen Reifen berücksichtigen.



- c) Bilden der Differenz von  $p_{\text{sol1}}$  und  $p_{\text{ist}}$  und Erzeugen eines Signals, wenn die Differenz einen definierten Wert überschreitet.

Mit diesen Verfahren (4 und 5) werden aus den Signalen der Raddrehzahlgeber Informationen herausgefiltert, die in dem System Reifen-Radaufhängung generiert werden. Die Informationen, die ausgewertet werden, beziehen sich auf die Rotationsschwingung des Reifens. Vorzugsweise wird der Bereich von 20 - 60 Hz aus der Resonanzfrequenz ausgewählt.

Statt der Erzeugung eines Warnsignals ist es nach Verfahren 5 auch möglich, den Reifenluftdruck zu berechnen und anzuzeigen. Dabei wird aus der Felgengeschwindigkeit die Eigenfrequenz der FelgendrehSchwingung ermittelt und über die Eigenfrequenz der FelgendrehSchwingung der Luftdruck innerhalb des Luftreifens berechnet. Dadurch ist es möglich, Sensoren zur Ermittlung der Radvertikalbewegung einzusparen und den Luftdruck innerhalb des Luftreifens allein anhand der Reifen- bzw. Felgendrehbewegung zu ermitteln. Die Eigenfrequenz der FelgendrehSchwingung ist druckabhängig, so dass der Luftdruck innerhalb des Luftreifens durch Bestimmung der Eigenfrequenz berechnet werden kann.

Vorteilhafterweise erfolgt die Berechnung des Reifenluftdruckes über einen Vergleich der ermittelten Eigenfrequenz mit vorab aufgenommenen Vergleichswerten. Diese Vergleichswerte der Eigenfrequenz wurden bei verschiedenen Felgengeschwindigkeiten bzw. Fahrgeschwindigkeiten gemessen und in einem Speicher abgelegt. Somit ergibt sich über ein Geschwindigkeitsfeld ein Verlauf von Eigenfrequenzen, der einem korrespondierenden Reifenluftdruck zugeordnet werden kann. Stimmt die berechnete Eigenfrequenz der FelgendrehSchwingung nicht mit dem Vergleichswert überein, liegt eine Abweichung

des Luftdruckes vor, die qualitativ und quantitativ berechnet werden kann.

Die Felgengeschwindigkeit wird zweckmäßigerweise über einen bereits vorhandenen ABS-Sensor aufgenommen, so dass kein zusätzlicher Sensor und kein zusätzlicher baulicher Aufwand betrieben werden muss, um die Eingangsgröße zu erhalten. Die Berechnung selbst wird in einer Auswerteeinheit, insbesondere einem Rechner ausgeführt.

Die Berechnung des Reifenluftdruckes erfolgt vorteilhafterweise unter Berücksichtigung der Betriebsparameter des Reifens, insbesondere der Reifentemperatur, da diese Einfluss auf die Eigenfrequenz der Drehschwingung hat, da sich über die Reifentemperatur die Steifigkeit und die Dämpfung des Luftreifens verändern, was wiederum Parameter sind, deren Veränderung die Eigenfrequenz beeinflussen.

Um die Eigenfrequenz der Felgendrehschwingung berechnen zu können, wird ein Reifenmodell verwendet, das vorab ermittelte Reifenparameter berücksichtigt, insbesondere werden die Rotationssteifigkeit und die Rotationsdämpfung des Reifens sowie das Trägheitsmoment des Reifens und der Felge als feststehende Größen des Reifens bzw. der Felge eingegeben. Bei einem Reifen- bzw. Felgenwechsel müssen entsprechend veränderte Parameter oder Kennwerte eingegeben und neue Vergleichswerte ermittelt werden. Das System muss bei einem Reifen- bzw. Felgenwechsel für Reifen anderer Dimension oder Bauart mit neuen Reifenparametern neu kalibriert werden.

Bei allen fünf Verfahren wird das Signal vorzugsweise erst erzeugt, wenn die Abweichung den definierten Wert über einen festgelegten Zeitraum, beispielsweise eine Minute, unterschreitet.

Die Gradienten  $1_{soll}$  und  $2_{soll}$  unterhalb und oberhalb der Resonanz bei Soll-Druck werden vorzugsweise für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert.

Vorzugsweise werden auch die xdB-, insbesondere 3dB-Grenzfrequenzen  $f_{G1soll}$ ,  $f_{G2soll}$  der Maxima für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert.

Auch die maximalen Amplitudenwerte  $a_{soll}$  bei Soll-Druck werden vorzugsweise für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert.

Die erste Korrelation der transformierten Differentialgleichungen mit der transformierten Eigenfrequenzkurve zur Ermittlung des Reifeninnendruckes  $p_{soll}$  bzw. der Rotationssteifigkeit  $c_s$  und der Rotationsdämpfung  $d_s$  wird vorzugsweise für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert.

Das Speichermedium kann ein Transponder oder ein Barcode sein. Die Verwendung eines Speichermediums hat den Vorteil, dass die reifentypischen Charakteristika vom Reifenhersteller ermittelt werden können und bei einem Radwechsel etwa veränderte Daten einfach dem Fahrzeug zugeordnet werden können.

Über die Lage der maximalen Amplitudenwerte kann die Reifendimension erkannt werden. Dabei wird die Erkenntnis ausgenutzt, dass die Seitenwand eines Reifens für große Felgendurchmesser in der Regel niedriger ist als für Reifen

mit kleinen Durchmessern. Je niedriger die Seitenwand ist, um so höher ist die Eigenfrequenz.

Vorzugsweise wird mit Hilfe eines Initialisierungsmittels am fahrenden Kraftfahrzeug eine von der Kraftfahrzeuggeschwindigkeit abhängige Kalibrierung durchgeführt.

Zur Ermittlung der normierten Amplitude erfolgt die Umrechnung vom Zeitbereich in den Frequenzbereich vorzugsweise über Tabellen.

Es hat sich als vorteilhaft herausgestellt, dass vor den beschriebenen Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks eines Fahrzeugreifens zuerst systematische und stochastische Störungen aus dem Frequenzspektrum eliminiert werden sollten, damit diese Störungen nicht zu falschen Ergebnissen hinsichtlich eines Reifendruckverlusts führen.

Vorteilhafterweise können auch zwei oder mehr der beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren miteinander kombiniert werden. Auch die Verwendung von einem oder mehreren erfindungsgemäßen Verfahren in einem direkt und/oder indirekt messenden Reifendrucküberwachungssystem ist im Hinblick auf die hierdurch erreichte erhöhte Sicherheit bzw. Redundanz vorteilhaft.

Bei der Auswertung der Frequenzkurve im Fahrbetrieb können durch die Last, die Temperatur, die Feuchtigkeit, den Umgebungsluftdruck und/oder die Fahrzeugbeschleunigung hervorgerufene Fremdeinflüsse kompensiert werden. Hierzu müssen natürlich entsprechende Sensoren vorgesehen sein.

Wenn entsprechende Sensoren vorgesehen sind, kann bei der Auswertung der Frequenzkurve im Fahrbetrieb auch die Profiltiefe, deren Veränderung durch den Verschleiß eine

Veränderung der Resonanzfrequenz bewirkt, berücksichtigt werden.

Die vorstehend beschriebenen Verfahren können mit einem indirekten System zur Erkennung des Minderluftdrucks gekoppelt werden.

Die nachfolgenden Zeichnungen verdeutlichen die unterschiedlichen Auswerteverfahren.

Es zeigt:

Figur 1 die Prinzipdarstellung der normierten Amplitude (logarithmisch aufgetragen) über der Frequenz;

Figur 2 Die Prinzipdarstellung der sich mit sinkendem Luftdruck verändernden Gradienten;

Figur 3 eine Darstellung der 3dB-Grenzfrequenzen an unterschiedlichen Maxima der Amplitude;

Figur 4 die Prinzipdarstellung des steigenden Amplitudenmaximums bei sinkendem Reifeninnendruck;

Figur 5 die prinzipielle Abhängigkeit der normierten Amplitude vom Reifenluftdruck;

Figur 6 das Modell zur Beschreibung der Radschwingungen;

Figur 7 die überlagerten Frequenzkurven nach dem Modell und den Werten aus den Raddrehzahlgebern;

Figuren 8 bis 10 - Frequenzverläufe.

Das Eigenschwingverhalten eines Reifens kann aus den Signalen der Rad-Drehzahlgeber, wie sie in Antiblockiersystemen verwendet werden, ermittelt werden.

Hier zeigt die Darstellung nach Figur 1 die Abhängigkeit der logarithmisch aufgetragenen normierten Amplitude über der Frequenz. Die Ermittlung dieser Kurve ist in der US 6,385,553 oder in der DE 101 57 885 sehr ausführlich erläutert, so dass hierzu keine weiteren Ausführungen gemacht werden.

Mit fallendem Reifeninnendruck bewirken die vom Druck abhängigen Größen Dämpfung und Steifigkeit des Reifens eine relative Verstärkung der Anregung der Felge bei Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz und eine Verminderung bei Frequenzen oberhalb der Resonanzfrequenz. Die Gradienten der Verstärkung unter- und oberhalb der Resonanz lassen sich nach Auswertung der Raddrehzahlssignale (beispielsweise über Fouriertransformationen über ganzzahlige Anzahlen von Umdrehungen bei annähernd gleicher Geschwindigkeit) ermitteln und über einen Vergleich mit dem zuvor kalibrierten Soll-Zustand des Reifens bei Soll-Innendruck als Maß für einen möglichen Minderluftdruck verwenden. Die Gradienten  $_{ist}$  und  $_{soll}$  werden zueinander ins Verhältnis gesetzt. Liegt dieser Wert über einen definierten Zeitraum außerhalb gesetzter Toleranzwerte, erfolgt eine Warnung vor zu niedrigem Reifendruck.

Bei der Ermittlung der Resonanzfrequenz muss ein repräsentatives Amplitudenspektrum verwendet werden. Hierzu sind stationäre Fahrbedingungen festzustellen. Auch muss eine adäquate Auflösung der Frequenz sichergestellt sein. Eine hohe Anzahl von Mittlungen der ermittelten Werte geben eine gute Schätzung des Luftdrucks, berücksichtigen die Gewichtung von Straßenverhältnissen (schlecht Oberfläche, ebene Oberfläche) und lassen eine Normierung der Schwingungsidentität zu.

Figur 3 zeigt die 3dB-Grenzfrequenzen, die vom Amplitudenmaximum aus ermittelt werden. Aus der Differenz

der oberen Grenzfrequenz  $f_{G2}$  und der unteren Grenzfrequenz  $f_{G1}$  wird die Differenzfrequenz  $f_G$  ermittelt. Bei sinkendem Luftdruck verkleinert sich die Differenzfrequenz, da die normierte Amplitude steigt, was zu einer Stauchung der Frequenzkurve führt (vgl. Figur 2). Je kleiner die Differenzfrequenz wird, um so niedriger ist der Luftdruck. Sinkt die Differenzfrequenz unter einen vorgegebenen Wert für eine definierte Zeitspanne, wird ein Signal erzeugt, das den Minderluftdruck anzeigt.

Figur 4 ist entnehmbar, dass sich die Amplitude in Richtung niedriger Frequenzen verlagert, wenn der Reifeninnendruck sinkt. Gleichzeitig erhöht sich der Maximalwert der Amplitude. Das Maximum wird ermittelt und mit dem Soll-Wert verglichen. Steigt der aktuell ermittelte Maximalwert über einen vorgegebenen Wert, wird das den Minderdruck anzeigende Signal erzeugt.

Die Lage der Grenzfrequenzen  $f_{G1}$ ,  $f_{G2}$ , die Größe der Gradienten  $_{soll}$ ,  $_{ist}$  und der Wert der maximalen Amplituden  $a_{soll}$ ,  $a_{ist}$ , ist neben dem Luftdruck von einer Vielzahl weiterer Parameter, wie beispielsweise dem Reifentyp und dem Abriebzustand abhängig. Das mit den vorgeschlagenen Verfahren arbeitende Reifendruckkontrollsystem muss deshalb kalibriert werden. Dabei wird ein Satz von Kalibrierungsparametern aufgenommen. Zum Auslösen der Initialisierung ist ein Initialisierungsmittel zu betätigen. Damit wird dem System dann mitgeteilt, dass alle Reifen korrekt befüllt sind. Vorzugsweise werden für unterschiedliche Geschwindigkeits- und Radmomentenbereiche eigene Kalibrierungsdatensätze aufgenommen. Immer wenn nach dem Betätigen des Initialisierungsmittels ein Geschwindigkeitsbereich das erste Mal gefahren wird, wird für diesen Bereich der Satz der Kalibrierparameter ermittelt.

Fremdeinflüsse, die die Lage der vorstehenden Werte beeinflussen, können kompensiert werden, wenn im Fahrzeug geeignete Messwerte zur Verfügung stehen. Diese können durch entsprechende Sensoren bestimmt werden. Aus dem Niveau-regulierungssystem kann die Radlast bestimmt werden. Durch den Außentemperatursensor, gegebenenfalls in Verbindung mit einem Temperaturmodell für Reifen, kann die Temperatur berücksichtigt werden. Beschleunigungen und Verzögerungen des Fahrzeugs können über die ABS-Sensoren oder den Bremslichtschalter ermittelt werden. Aus der Motorsteuerung kann der Umgebungsluftdruck berücksichtigt werden. Die Profiltiefe kann durch Ermittlung des Abrollumfangs (zurückgelegte Wegstrecke/Raddrehzahl) ermittelt werden.

Figur 6 zeigt das Modell zur Ermittlung der Reifenschwingungen. Das Rad besteht aus der Felge 1 mit der Trägheit  $J_F$  und dem Gürtel 2 mit der Trägheit  $J_R$ . Das Rad ist über die Radaufhängung mit der Federung 4 und der Dämpfung 5 mit dem Aufbau 3 verbunden. Die Dämpfung der Drehschwingungen des Rades erfolgt über die Rotationsfeder-Dämpfereinheit 6, mit der Federkonstanten  $c_s$  und der Dämpferkonstanten  $d_s$ . Die Aufbaufeder 4 weist die Federkonstante  $c_a$  und der Aufbaudämpfer 5 die Dämpferkonstante  $d_a$  auf. Der Gürtel 1 wird mit der Winkelgeschwindigkeit und die Felge 1 mit der Winkelgeschwindigkeit bewegt. Die Anregung zur Schwingung erhält das Rad über die Straße mit der Kraft  $F_t$ .

Betrachtet man nur das Rad allein und vernachlässigt die Ankopplung des Rades an den Aufbau 3 über Federung 4 und Dämpfung 5, so lässt sich die Rotation von Reifen 1 und Felge 2 nach diesem Modell durch folgende Differentialgleichungen beschreiben:



Die Rotationssteifigkeit  $c_s$  und die Rotationsdämpfung  $d_s$  sind unter anderem sowohl vom Luftdruck  $p$ , dem Radaufhängungstyp als auch der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Der dynamische Abrollradius  $r$  wird in diesem Ansatz durch einen konstanten Reifenradius  $R$  ersetzt.

Das obige Differentialgleichungssystem kann vorteilhaft und schnell mit einer Laplace-Transformation im Frequenzbereich gelöst werden. Zunächst wird das Differentialgleichungssystem in ein System erster Ordnung umgeschrieben:

Umgeschrieben ergibt dieses das folgende Differentialgleichungssystem:

:

Dieses Differentialgleichungssystem wird nun einer Laplace-Transformation unterworfen. Dabei gilt:

mit der komplexen Variablen  $s$ .

Dadurch erhält man aus dem linearen Differentialgleichungssystem ein lineares Gleichungssystem:

A \* =

mit

$A =$

Sei

$A^* =$

setzt man nun

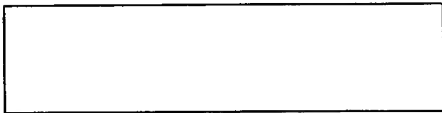
$$S = i \omega$$

( $i^2 = -1$ ,  $\omega =$  Kreisfrequenz)

und berücksichtigt man, dass



ist, so erhält man direkt den Frequenzgang, ohne  $F_t$  angeben zu müssen:



Durch das Reifenmodell ist es möglich, ohne aufwendige Messungen schnell und genau die Eigenfrequenz bestimmen zu können. Das ABS-Signal liefert das Frequenzspektrum der Felgendrehschwingung wie es gemessen wurde. Ein Beispiel eines gemessenen Frequenzspektrums 10 ist in der Figur 8a dargestellt. Ein zweites Frequenzspektrum 20 gemäß Figur 8b erhält man, indem ein Dirac-Impuls oder eine tangentiale Anregung  $F_t$  auf das Modell angewendet wird, anhand dessen das Frequenzspektrum 20 des Modells in Abhängigkeit von den Modellparametern berechnet wird.

Durch die Variation der Parameter hinsichtlich der Rotationssteifigkeit  $c_s$  und Rotationsdämpfung  $d_s$  kann das Modell auf das gemessene Spektrum für eine bestimmte Geschwindigkeit und einen bestimmten Luftdruck des Reifens, z. B. durch Finden des Minimums der Summe der Fehlerquadrate zwischen Modell und gemessenen Spektrum, kalibriert werden, was in der Figur 9 dargestellt ist.

Über festgelegte Parameter  $c_s$  für die Rotationssteifigkeit des Reifens und  $d_s$  für die Rotationsdämpfung des Reifens wird der Reifen identifiziert und das Reifenmodell kann dazu benutzt werden, um den tatsächlichen Reifenluftdruck zu bestimmen. Dies erfolgt, indem das gemessene Frequenzspektrum durch Variationen des Luftdruckes innerhalb des Modells an das Modellfrequenzspektrum angepasst wird. Ein angepasster Frequenzverlauf ist in der Figur 10 dargestellt. Sobald eine hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen dem gemessenen Frequenzspektrum 10 und dem Modellfrequenzspektrum 20 erreicht ist, ist der tatsächlich vorhandene Reifenluftdruck bestimmt und kann über ein Display ausgegeben werden. Alternativ kann bei Unterschreiten oder Überschreiten eines Grenzwertes eine Warnmeldung ausgegeben werden.

Alternativ zur expliziten Lösung des obigen Differentialgleichungssystems per Laplace-Transformation können empirische Lösungsfunktionen eingesetzt werden, die anpassbare Parameter enthalten. Zum Beispiel kann ein typisches Spektrum für das jeweilige Fahrzeug durch folgende Modellgleichung für die Amplitude

beschrieben werden, wobei die Konstanten  $a$ ,  $b$ ,  $e$  und  $n$  an das Fahrzeug angepasst werden müssen und  $n$  zwischen 0,3 und

0,9 liegen muss. Das Ergebnis dieser Bestimmung ist Figur 7 entnehmbar.

Die durchgezogene Linie zeigt das normierte Amplitudenspektrum des Raddrehzahlgeber, die Strich-Punkt-Linie das Ergebnis des Modells. Der Reifenluftdruck  $p$  wird aus den ermittelten Werten von Steifigkeit und Dämpfung  $c_s$ ,  $d_s$  durch Anpassung der gerechneten Modellkurven an gemessenen Kurven als Funktion  $p=f(c_s, d_s)$  bestimmt.

Die Eliminierung von systematischen und stochastischen Störungen in dem Frequenzspektrum im Vorfeld der beschriebenen Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks eines Fahrzeugreifens hat sich als sinnvoll herausgestellt, damit diese Störungen nicht zu falschen Ergebnissen hinsichtlich eines Reifendruckverlusts führen.

Folgende Typen von systematischen Störungen müssen aus dem Spektrum eliminiert werden:

1. radumdrehungssynchron anfallende Störungen, wie z. B. der Polteilungsfehler des Encoders zur Messung der Radgeschwindigkeit, allgemeine Reifen- und Felgenungleichförmigkeiten oder auch Einbautoleranzen
2. Störungen aufgrund von Vibrationen im Antriebsstrang, die nur an den angetriebenen Rädern auftreten
3. Störungen aufgrund von monofrequenten Anregungen der Straße

Zur Eliminierung dieser Störungen wird zunächst die Störfrequenz identifiziert und dann im Spektrum die zu dieser Frequenz gehörige Amplitude z. B. durch den Mittelwert der Amplituden der Nachbarfrequenzen ersetzt. Es empfiehlt sich dabei auch höhere Ordnungen dieser Störfrequenzen zu eliminieren. Störfrequenzen des Motors zeigen sich beispielsweise abhängig von der Bauart des Motors bei ganzzahligen Vielfachen der Motorgrundfrequenz

sowie z. T. auch bei ganzzahligen Vielfachen der halben Motorgrundfrequenz.

Zur Identifikation der verschiedenen systematischen Störfrequenzen werden folgende Verfahren angewendet:

Zu (1): Störfrequenzen sind die Raddrehfrequenz und ihre ganzzahligen Vielfachen im relevanten Frequenzbereich.

Zu (2): - Störfrequenz ist die Motordrehfrequenz, berechnet aus der Motordrehzahl vom Fahrzeugdatenbus, z. B. CAN, sowie ganzzahlige Vielfache der Motordrehfrequenz und der halben Motordrehfrequenz. Liegt die Information über den Motortyp z. B. auch auf dem Fahrzeugdatenbus oder kann dieser aus dort vorliegenden Informationen abgeleitet werden, so empfiehlt es sich, nur die für den jeweiligen Motortyp relevanten Ordnungen zu eliminieren  
- Getriebedrehfrequenzen, berechnet aus der Raddrehzahl (ggf. auch der Motordrehzahl) und den Übersetzungsverhältnissen/Zähnezahlen

Zu (3): Störfrequenzen, die von der Straße angeregt werden, sind am Vorder- und Hinterrad der gleichen Fahrzeugseite erkennbar. Durch einen Vergleich der Spektren von Vorder- und Hinterrad für zeitgleich ermittelte Signale können diese identifiziert werden.

Ergebnis dieses Verfahrensschritts ist ein um die systematischen Störungen bereinigtes ungefiltertes Frequenzspektrum z. B. in Form der spektralen Leistungsdichte.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass es erheblich einfacher ist, diese systematischen Störungen im Frequenzbereich zu eliminieren als bereits schon im Zeitbereich.

Zur Eliminierung von stochastischen Störungen werden die Spektren über einen längeren Zeitraum gemittelt bzw. es wird

ein gefiltertes Frequenzspektrum berechnet. Hierbei werden an ein einzelnes ungefiltertes Spektrum bestimmte Güteanforderungen gestellt, z. B. Mindestenergieinhalt (da Eigenschwingung auf sehr glatten Straßen kaum ausgeprägt ist), Ausgeprägtheit des Peaks, etc.

Für den Fall, dass diese Anforderungen nicht erfüllt sind, wird dieses Spektrum nicht für die Berechnung des mittleren bzw. gefilterten Spektrums herangezogen.

**Patentansprüche:**

1. Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Fahrzeugreifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die Amplitudenmaxima der Resonanzfrequenz beobachtet werden, **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:
  - a) Ermitteln und Aufzeichnen der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
  - b) Ermitteln und Speichern der Gradienten  $1_{soll}$ ,  $2_{soll}$  der Frequenzkurve oberhalb und unterhalb der Resonanz,
  - c) Bilden des Verhältnisses  $s_{soll}$  aus den Gradienten  $1_{soll}$  und  $2_{soll}$ ,
  - d) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
  - e) kontinuierliches Ermitteln der Gradienten  $1_{ist}$ ,  $2_{ist}$  der Frequenzkurve oberhalb und unterhalb der Resonanz,
  - f) Bilden des Verhältnisses  $i_{ist}$  aus den Gradienten  $1_{ist}$  und  $2_{ist}$ ,
  - g) kontinuierliches Vergleichen der Verhältnisse  $i_{ist}$  und  $s_{soll}$  miteinander,
  - h) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von  $i_{ist}$  zu  $s_{soll}$  einen definierten Wert überschreitet.

2. Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Fahrzeugreifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die Amplitudenmaxima der Resonanzfrequenz beobachtet werden, **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:

- a) Ermitteln und Aufzeichnen der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
- b) Ermitteln der xdB-, insbesondere 3 dB-Grenzfrequenz  $f_{G1soll}$ ,  $f_{G2soll}$  der Maxima,
- c) Bilden und Speichern der Differenzfrequenz  $f_{Gsoll}$  aus der oberen xdB-Grenzfrequenz  $f_{G2soll}$  und der unteren xdB-Grenzfrequenz  $f_{G1soll}$ ,
- d) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
- e) kontinuierliches Ermitteln der xdB-, insbesondere 3dB-Grenzfrequenzen  $f_{G1ist}$ ,  $f_{G2ist}$  der Maxima im Fahrbetrieb,
- f) Bilden der Differenzfrequenz  $f_{Gist}$  aus der oberen xdB-Grenzfrequenz  $f_{G2ist}$  und der unteren xdB-Grenzfrequenz  $f_{G1ist}$ ,
- g) kontinuierliches Vergleichen der Differenzfrequenzen  $f_{Gsoll}$  und  $f_{Gist}$  miteinander,
- h) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von  $f_{Gist}$  zu  $f_{Gsoll}$  einen definierten Wert überschreitet.



3. Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Fahrzeugreifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die Amplitudenmaxima der Resonanzfrequenz beobachtet werden, **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:
- a) Ermittlung und Aufzeichnung der Resonanzfrequenz des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck,
  - b) Ermitteln und Speichern des maximalen Amplitudenwertes  $a_{\text{soll}}$  bei Soll-Druck des Reifens,
  - c) kontinuierliches Ermitteln der Resonanzfrequenz des Rades im Fahrbetrieb,
  - d) kontinuierliches Ermitteln des maximalen Amplitudenwertes  $a_{\text{ist}}$ ,
  - e) kontinuierliches Vergleichen der maximalen Amplitudenwerte  $a_{\text{soll}}$  und  $a_{\text{ist}}$  miteinander,
  - f) Erzeugen eines Signals, wenn die Abweichung von  $a_{\text{ist}}$  zu  $a_{\text{soll}}$  einen definierten Wert überschreitet.
4. Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Fahrzeugreifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die Resonanzfrequenz beobachtet wird, **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:
- a) Ermitteln und Aufzeichnen des Frequenzspektrums des Rades mit einem vorgegebenen Soll-Druck und

Bestimmung der ungefähren Lage der Resonanzfrequenz,

- b) Transformieren der das Schwingungsverhalten des Rades beschreibenden Differentialgleichungen

mittels Laplace- oder Fouriertransformation,

- c) Auswählen eines Bereichs  $f_{soll}$  um die ungefähre Lage der Resonanzfrequenz  $f_{soll}$  herum,
- d) Korrelieren des ausgewählten Bereichs  $f_{soll}$  mit den transformierten Differentialgleichungen,
- e) Berechnen der Rotationssteifigkeit  $c_{s,soll}$  und der Rotationsdämpfung  $d_{s,soll}$ ,
- f) kontinuierliches Ermitteln des Frequenzspektrums des Rades im Fahrbetrieb und Bestimmung der ungefähren Lage der Resonanzfrequenz  $f_{ist}$ ,
- g) Auswählen eines Bereichs  $f_{ist}$  um die ungefähre Lage der Resonanzfrequenz  $f_{ist}$  herum,
- h) Korrelieren des ausgewählten Bereichs  $f_{ist}$  der ermittelten Resonanzfrequenz  $f_{ist}$  mit den transformierten Differentialgleichungen zur Bestimmung der Rotationssteifigkeit  $c_{s,ist}$  und der Rotationsdämpfung  $d_{s,ist}$ ,
- i) Bilden der Differenz von  $c_{s,soll}$  und  $c_{s,ist}$  und der Differenz von  $d_{s,soll}$  und  $d_{s,ist}$  und Erzeugen eines

Signals, wenn mindestens eine der Differenzen einen definierten Wert überschreitet.

5. Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Fahrzeugreifens eines Kraftfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die Resonanzfrequenz beobachtet wird, **gekennzeichnet durch** folgende Schritte:
  - a) Ermitteln des Reifeninnendrucks  $p_{soll}(c_s, soll, d_s, soll)$  im Sollzustand in Abhängigkeit von der Rotationssteifigkeit  $c_s$  und der Rotationsdämpfung  $d_s$ , wobei hierzu Kennfelder herangezogen werden, die die für das jeweilige Fahrzeug typischen Reifen berücksichtigen,
  - b) Ermitteln des Reifeninnendrucks  $p_{ist}(c_s, ist, d_s, ist)$  im Istzustand in Abhängigkeit von der Rotationssteifigkeit  $c_s$  und der Rotationsdämpfung  $d_s$ , wobei hierzu Kennfelder herangezogen werden, die die für das jeweilige Fahrzeug typischen Reifen berücksichtigen,
  - c) Bilden der Differenz von  $p_{soll}$  und  $p_{ist}$  und Erzeugen eines Signals, wenn die Differenz einen definierten Wert überschreitet.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Signal erst erzeugt wird, wenn die Abweichung den definierten Wert über einen festgelegten Zeitraum überschreitet.
7. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Gradienten  $1_{soll}$ ,  $2_{soll}$  unterhalb und oberhalb der

- Resonanz bei Soll-Druck für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert werden.
8. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die xdB-Grenzfrequenzen  $f_{G1soll}$ ,  $f_{G2soll}$  der Maxima bei Soll-Druck für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert werden.
  9. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass der maximale Amplitudenwert  $a_{soll}$  bei Soll-Druck für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert wird.
  10. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Korrelation der transformierten Differentialgleichungen mit der transformierten Eigenfrequenzkurve  $f_{soll}$  zur Ermittlung des Reifeninnendrucks  $p_{soll}$  oder der Rotationssteifigkeit  $c_s$  und der Rotationsdämpfung  $d_s$  für einen speziellen Reifentyp extern ermittelt und auf einem mit dem Reifen verbindbaren Speichermedium gespeichert wird.
  11. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Speichermedium ein Transponder ist.
  12. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Speichermedium ein Barcode ist.
  13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der Auswertung der Frequenzkurve im Fahrbetrieb durch die Last, die

Temperatur, die Feuchtigkeit, den Umgebungsluftdruck und/oder die Fahrzeugbeschleunigung hervorgerufene Fremdeinflüsse kompensiert werden.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass bei der Auswertung der Frequenzkurve im Fahrbetrieb die Profiltiefe des Reifens berücksichtigt wird.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass mit Hilfe eines Initialisierungsmittels am fahrenden Kraftfahrzeug eine von der Kraftfahrzeuggeschwindigkeit abhängige Kalibrierung durchgeführt wird.
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Umrechnung vom Zeitbereich in den Frequenzbereich über Tabellen erfolgt.
17. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass über die Lage der maximalen Amplitudenwerte  $a_{ist}$  die Reifendimension erkannt wird.
18. Verfahren nach einem oder mehreren der vorstehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** die Kopplung mit einem indirekten System zur Erkennung des Mindestluftdrucks.
19. Verwendung mindestens eines der Verfahren 1 bis 5 in einem direkten und/oder indirekten Reifendrucküberwachungssystem.

## Zusammenfassung

### Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks eines Fahrzeugreifens

Die Erfindung betrifft verschiedene Verfahren zur Ermittlung des Innendrucks, insbesondere des Minderdrucks des Reifens eines KRAFTfahrzeuges im Fahrbetrieb durch Analyse des Eigenschwingverhaltens des Rades, wobei aus dem ermittelten Schwingungsspektrum die normierte Amplitude ermittelt wird und die Resonanzfrequenz beobachtet wird.

(Fig. 6)